

非線形超音波による閉じたき裂の非破壊評価法

著者	小原 良和
号	51
学位授与番号	3823
URL	http://hdl.handle.net/10097/37491

氏 名	お はら よしかず		
授 与 学 位	小 原 良 和		
学位授与年月日	博士（工学）		
学位授与の根拠法規	平成19年3月27日		
研究科，専攻の名称	学位規則第4条第1項		
学位論文題目	東北大学大学院工学研究科（博士課程）材料システム工学専攻		
指 導 教 員	非線形超音波による閉じたき裂の非破壊評価法		
論文審査委員	主査	東北大学教授 山中 一司	東北大学教授 櫛引 淳一
		東北大学教授 進藤 裕英	

論文内容要旨

近年、原子力発電所の超音波検査で閉じたき裂が過小評価される事例が報告されており、その解決が急務となっている。閉じたき裂は、原子力発電所のみならず、高速道路の橋脚、トンネル、石油・化学プラント、航空機産業や素材・製品の製造プロセスなどでも今後問題が顕在化するものと考えられ、安心かつ安全な環境調和型循環社会の構築には、それらの非破壊評価法の基盤技術の確立が不可欠である。しかし、超音波計測では原理的に閉じたき裂の評価はできないため工学的に残された重要課題だった。本論文は、非線形超音波による閉じたき裂の非破壊評価法の基盤技術を確立するために行った研究成果をまとめたものであり、全編6章からなる。以下に各章の要旨をまとめる。

第1章 序論

非破壊評価の必要性について全体的な見地から述べた後、従来の線形超音波による評価例を示す一方で、線形超音波では閉じたき裂に対する有効な評価法が存在しない現状について述べた。これに対して、非線形超音波が閉じたき裂評価に有用であることを述べ、さらに、非線形超音波の過去の研究の現状および問題点を明らかにし、本研究の目的および構成について述べた。

第2章 接触界面の波動の非線形現象に関する理論的研究

非線形超音波画像化システムの設計指針を得るため、接触界面の非線形振動に関する理論的研究を行った。凝着力を導入した解析解を導出して、ある入射波振幅を超えるとサブハーモニック波が急激に立ち上がるしきい値現象の実験結果を概念的に説明した。さらに、入射波送信用探触子などの設計指針を得るため、材料の物性値、実験条件をパラメータに反映させられ、反射波の取り扱いも可能な弾性体-振動子モデルを構築した。アルミニウム合金 A7075 の閉じた疲労き裂に

おいて、サブハーモニック波発生
の入射波振幅および閉口応力依
存性を数値解析で調べ、実験の観
察波形と比較して妥当性を示し
た (Fig. 1)。また、波形最終部に
現れる低周波成分 (テール効果)
がき裂面の自由振動によること
を解明した。

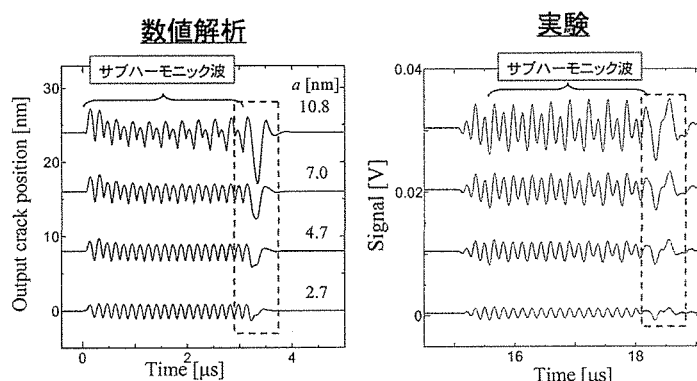


Fig. 1. Comparison between numerical calculation and experimental results.

第3章 非線形超音波画像化システムの構築

厚さ方向の閉じたき裂長さを画像により計測する手法として、非線形超音波画像化システムを構築した (Fig. 2)。まず、厚さ方向の画像化を電子スキャンで行うことができるフェーズドアレイセンサの音場解析を行い、方位分解能の検討からアレイセンサの設計指針を得た。非線形超音波測定に必要な大変位振幅超音波を安定して入射するため、耐圧性に優れた LiNbO_3 単結晶 (単一素子) を用いて送信用探

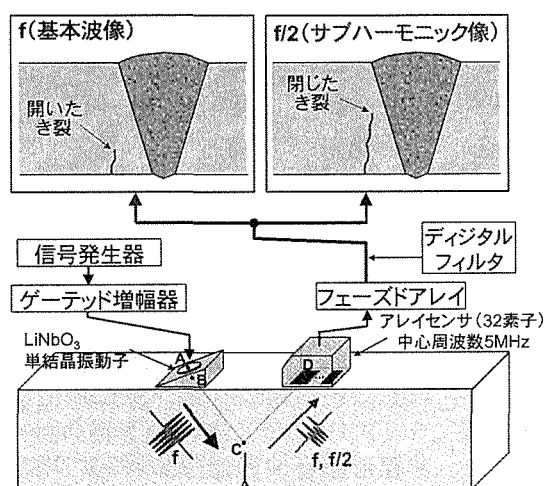


Fig. 2. Schematic diagram of nonlinear ultrasonic imaging apparatus.

触子を試作した。これらを組み合わせて、送信側に単一素子、受信側にアレイセンサを用いた配置で、画像化を行うために必要な伝搬時間および素子間の遅れ時間を定式化した。さらに、受信波形から線形および非線形成分を抽出するため、IIR デジタルフィルタを設計した。これらの技術を組み合わせて開発した非線形超音波画像化システムを、アルミニウム試験片の丸穴（線形欠陥）に適用することにより、その基本性能を確認した。

第 4 章 疲労き裂への適用

第 3 章で開発した非線形超音波画像化システムを、適切な条件で作製した閉じた疲労き裂に適用した。まず、アルミニウム試験片の閉じたき裂で、基本波像およびサブハーモニック像においてき裂端部からの散乱波強度の入射波振幅依存性を観察した。その結果、基本波像ではき裂端部は観察されず、サブハーモニック像でのみ観察される最適な入射波振幅が存在することを示した。アルミニウム合金 A7075 の開いたき裂 ($K_{max}=5.3$, $K_{min}=0.6 \text{ MPa}\sqrt{m}$) および閉じたき裂 ($K_{max}=4.3$, $K_{min}=0.6 \text{ MPa}\sqrt{m}$) に適用し、開いたき裂端部は基本波像で、閉じたき裂端部はサブハーモニック像により初めて観察できることを示した。さらに、原子力発電所の再循環系配管などでも使用されているオーステナイト系ス

テンレス鋼 SUS316L 試験片（実機と同程度の厚さ）に疲労条件 $K_{max}=18.6$, $K_{min}=0.6 \text{ MPa}\sqrt{m}$ で導入した閉じたき裂に非線形超音波画像化システムを適用し、基本波像およびサブハーモニック像の閉口応力依存性を観察した (Fig. 3)。その結果、100MPa 以上の閉口応力でき裂が閉じており、基本波像では過小評価してしまうき裂長さをサブハーモニック像により曲げ応力によらず正確に計測できることを示した。

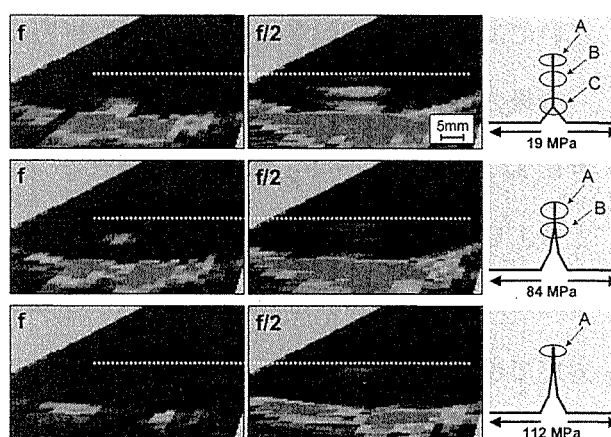


Fig.3. Dependence of crack images with varying static bending stress in fatigue crack of SUS316L.

第5章 鉄鋼製造プロセスで発生したき裂の評価

非線形超音波画像化システムを実際の鉄鋼製造プロセスで発生した3つのき裂に適用した。ニッケルクロムモリブデン鋼の丸棒鋼素材の実際の製造プロセスで発生した傾斜した閉じたき裂に対して、より感度良く測定を行うため、後方散乱配置の非線形超音波画像化システムを適用した。その結果、傾斜形状や枝分かれを明瞭に画像化することができ、表面観察によるき裂長さよりも、実際のき裂は進展しているという知見が得られた。このことから、現場で発生した枝分かれや傾斜した閉じたき裂に対しても、非線形超音波画像化システムが有効であることを示した。

第6章 結言

本研究では、基礎実験と理論解析を組み合わせることで得られた非線形現象の知見に基づいて、材料強度の評価に必要な深さ方向の閉じたき裂長さの画像化を実現すべく、送信側探触子、受信側アレイセンサ、画像化アルゴリズム、フィルタリング技術を構築・組み合わせることで、非線形超音波画像化システムを構築した。これを閉じた疲労き裂および現場で発生した閉じた傾斜・枝分かれき裂に適用することで、その有効性を実証した。これにより、非線形超音波による閉じたき裂の非破壊評価法の基盤技術を確立した。

今後の展望としては、本研究では、配管系など狭い領域での検査を想定して受信側センサに32素子のアレイセンサを使用した。第3章で述べたように、素子数を増大させることにより、さらに方位分解能が改善される。また、多素子2次元アレイセンサを用いれば、複雑に分岐する粒型界応力腐食割れ（Inter-Granular Stress Corrosion Cracking, IG-SCC）にも対応できる。さらに、送信側探触子も本研究で得られた LiNbO_3 の耐圧性の知見に基づき、耐圧性に優れたアレイセンサを作製することで、更なる高感度化が期待される。

閉じたき裂検出のための非線形超音波画像化システム構築の波及効果は、原子力発電所や鉄鋼製造プロセスにおける検査精度向上のみならず、設計寿命を迎えた高速道路の橋脚、トンネル、石油・化学プラントの長寿命化や航空機産業などにも及ぶ。このように、安全かつ安心な社会基盤の確保、さらには環境調和型循環社会構築のキーテクノロジーとして

期待される。

論文審査結果の要旨

近年、原子力発電所の超音波検査で閉じたき裂が過小評価される事例が報告されており、その解決が急務となっている。本論文は、非線形超音波による閉じたき裂の非破壊評価法の基盤技術を確立するために行った研究成果をまとめたものであり、全編6章からなる。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的について述べている。

第2章は、接触界面の非線形振動に関する理論的研究について述べている。すなわち、凝着力を導入した解析解を導出して、ある入射波振幅を超えるとサブハーモニック波が急激に立ち上がるしきい値現象の実験結果を概念的に説明している。さらに、材料の物性値、実験条件をパラメータに反映させることができ、反射波の取り扱いも可能な弾性体-振動子モデルを構築した。アルミニウム合金A7075の閉じた疲労き裂において、サブハーモニック波発生の入射波振幅および閉口応力依存性を数値解析で調べ、実験の観察波形と比較して妥当性を示している。また、波形最終部に現れる低周波成分（テール効果）がき裂面の自由振動によることも解明している。

第3章では、材料の強度評価に必要な厚さ方向の閉じたき裂長さを映像により計測するための非線形超音波画像化システムの構築について述べている。送信側探触子、受信側アレイセンサ、画像化アルゴリズム、フィルタリング技術など、各要素技術を構築し、組み合わせることで、非線形超音波画像化システムを開発し、丸穴（線形欠陥）に適用することで、その基本性能を実証している。

第4章では、第3章で開発した非線形超音波画像化システムを、適切な疲労条件で作製した閉じた疲労き裂に適用し、その有効性について述べている。アルミニウム合金A7075に導入した開いたき裂および閉じたき裂に適用し、開いたき裂端部は基本波像で、閉じたき裂端部はサブハーモニック像で初めて観察できたことを示している。さらに、原子力発電所の再循環系配管と同程度の厚さのオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L の試験片に適切な疲労条件で閉じた疲労き裂を作製し、その閉口応力依存性を画像化することで、基本波像では過小評価してしまうき裂長さを、サブハーモニック像で正確に評価できたことを示している。

第5章では、ニッケルクロムモリブデン鋼の丸棒鋼素材の実際の製造プロセスで発生した閉じたき裂に、後方散乱配置の非線形超音波画像化システムを適用することで、枝分かれや傾斜したき裂に対しても有効であることを示している。

第6章は結論であり、本研究を総括し、将来の展望について述べている。

以上要するに本論文は、非線形超音波による閉じたき裂の非破壊評価法の基盤技術を確立したものであり、原子力発電所におけるき裂過小評価のみならず、設計寿命を迎えた各種社会基盤構造物の評価への波及効果も期待され、材料システム工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。